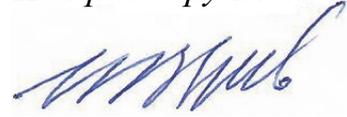


На правах рукописи



ЗВЕРЕВ ИВАН ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ
МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПО СХЕМЕ «ОБЖИМ»
ТОНКОСТЕННЫХ ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК
В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тула – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула.

Научный руководитель:

Пасько Алексей Николаевич,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Мамутов Вячеслав Сабайдинович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург), профессор
высшей школы машиностроения

Самохвалов Владимир Николаевич,
доктор технических наук, ФГАОУ ВО
«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара), профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)» (г. Новосибирск)

Защита состоится «3» декабря 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.417.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, учебный корпус 9, ауд. 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:

<https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-01/zverev-iv-24-2-417-01>

Автореферат разослан «27» сентября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Анцев Александр Витальевич

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Современное развитие машиностроения в России, в частности развитие военно-промышленного комплекса (ВПК) требует внедрения новых прогрессивных технологий для повышения качества и уменьшения себестоимости изготовления продукции.

Широкое применение в различных областях машиностроения нашли тонкостенные полые осесимметричные детали из различных металлов и сплавов. Эффективным способом изготовления подобных деталей является магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ), при которой происходит высокоскоростное воздействие импульсного магнитного поля (ИМП) к заготовкам, предпочтительно изготовленным из высокоэлектропроводящего (медь, алюминий, бронза и т.д.) материала без механического контакта и без рабочей среды. В настоящее время применение данной технологии в России ограничивается единичным и мелкосерийным производством с широкой номенклатурой обрабатываемых деталей. Распространению МИОМ препятствуют известные недостатки (требования по материалу и геометрии заготовки, долговечность инструмента -индуктора, прогнозирование свойств материала при высокоскоростном нагружении и т.п.). Как следствие, изготовлению сложных образцов новых деталей (являющихся ответственными элементами конструкций) предшествуют длительные теоретические и экспериментальные исследования. Стоит отметить, что единая расчетная методика МИОМ, основанная на комплексном междисциплинарном исследовании данного процесса, в настоящий момент отсутствует. Однако существует ряд программных комплексов, позволяющих моделировать процесс МИОМ и проводить оптимизацию системы «установка-индуктор-заготовка».

Индукторные системы, выпускаемые в России, рассчитаны для работы на предприятиях аэрокосмической промышленности, то есть в условиях единичного и мелкосерийного производства. При внедрении МИОМ в серийном производстве возникает ряд проблем, связанных прежде всего с конструированием, повышением прочности и снижением себестоимости данного инструмента, а также разработки приспособлений для выполнения операций и получения точности обрабатываемых деталей.

Таким образом, теоретическое и экспериментальное обоснование новой конструкции индукторных систем на «обжим», снижающей его себестоимость, а также разработка новых приспособлений для обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок методом МИОМ в условиях серийного производства, повышающих геометрическую точность этих изделий является **актуальной научно-технической задачей.**

Целью работы является повышение эффективности технологических процессов магнитно-импульсной обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок в условиях серийного производства путем совершенствования алгоритма расчета параметров данного процесса и исследования прочностных характеристик индукторных систем на «обжим», а также использования технических

и технологических решений, снижающих себестоимость и повышающих геометрическую точность изготавливаемых изделий. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Проанализировать современные методики расчета параметров МИОМ с целью адаптации их к условиям серийного производства для обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок.

2. Усовершенствовать алгоритм расчета параметров процесса МИОМ с учетом прочностных характеристик индукторных систем на «обжим» и возможности использования полученных данных для последующего компьютерного моделирования.

3. Исследовать воздействие давления электродинамических сил на токопровод и межвитковую изоляцию индукторных систем на «обжим», а также совместное влияние их геометрических и физических параметров на прочность индукторных систем на «обжим» при МИОМ, определить опасную зону токопровода при разряде в которой возможно разрушение витков в следствии максимальных механических напряжений.

4. Разработать конструкцию и технологию изготовления индукторных систем на «обжим», а также технологической оснастки для расширения возможностей МИОМ в условиях серийного производства.

5. Использовать результаты исследования в промышленности и учебном процессе.

Достоверность результатов обеспечена корректностью постановки задач, обоснованном использованием теоретических зависимостей, использованием современных методов компьютерного моделирования мирового уровня, а также практическим использованием результатов на предприятиях военно-промышленного комплекса.

Область исследования соответствует п. 2. "Новые методы пластического формоизменения и изменения свойств заготовок сжатием, ударом, магнитно-импульсным и иными воздействиями" паспорта специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Объектом исследования является технологический процесс магнитно-импульсной обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок в условиях серийного производства.

Предметом исследования является установление зависимости прочности индукторной системы от геометрических параметров и свойств материалов токопроводов и межвитковой изоляции в процессе формоизменения методом МИОМ.

Научная новизна:

Установлено влияние на прочность индукторной системы на «обжим» с осевым закреплением без внешнего бандажа его геометрических параметров и механических характеристик материала токопровода и межвитковой изоляции, выявлена зона опасного сечения, в которой возможно разрушение токопровода вследствие максимальных механических напряжений, возникающих при разряде, что позволяет уточнить расчёт сечения витков токопровода.

Практическая ценность:

1. Разработана конструкция индукторных систем с токопроводом сварного типа на «обжим» (внедрены на серийном производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод»).
2. Разработаны конструкции оснастки для выполнения операции «обжим» с использованием сборных оправок для повышения качества изготовления полых осесимметричных деталей в условиях серийного производства.
3. Разработано программное обеспечение для расчета технологических параметров процессов МИОМ (необходимое количество витков индуктора, собственные сопротивления и индуктивности индуктора и заготовки, энергия разряда).
4. Результаты исследований использованы для разработки новых технологических процессов изготовления деталей «Корпус» и «Обтюратор», внедренных на серийном производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод». Общий экономический эффект при внедрении составляет более 1,5 млн рублей.
5. Отдельные материалы исследования использованы на предприятии АО «Тулаточмаш», в учебных процессах кафедр «Механика и процессы пластического формоизменения» (МиППФ) ТулГУ и А2 «Технология конструкционных материалов в производстве ракетно-космической техники» БГТУ «Военмех».

Методы исследования. В работе применялось решение аналитических уравнений с целью определения основных параметров МИОМ. Моделирование поведения токопровода индуктора (модуль ANSYS Transient Structural), моделирование техпроцессов деталей «Корпус» и «Обтюратор» (модуль LS-DYNA с электромагнитным решателем) проводилось в программном комплексе ANSYS. Практические работы проводились на магнитно-импульсной установке МИУ-30 (ПАО «Императорский тульский оружейный завод»). Измерение индуктивности индукторных систем, а также измерение индуктивности системы «индуктор-заготовка» проводились с помощью прибора RLC АК ИП 6108. Получение токовой кривой процесса (с помощью петли Роговского) производилось на цифровом осциллографе FNIRST 1014D.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованный алгоритм расчета параметров МИОМ с уточнением собственных индуктивностей и сопротивлений индуктора и заготовки с возможностью использования полученных данных для последующего моделирования в программе реализующей МКЭ.
2. Результаты компьютерного моделирования на базе программы ANSYS прочностных расчетов токопровода и изоляции индукторных систем на «обжим».
3. Вторичная математическая модель зависимости прочности индукторной системы от момента сопротивления материала токопровода в диапазоне его внутреннего диаметра от 50 до 153 мм.

4. Конструкция индукторной системы с токопроводом, изготовленным методом сварки витков, а также конструкции сборных оправок для цилиндрических деталей, получаемых методом МИОМ, для расширения возможностей применения данной технологии в условиях серийного производства.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: XIII Международная научно-техническая конференция "Прикладная механика и динамика систем" (г. Омск, 2019 г.); XII общероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); XIII общероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); XXIII всероссийская конференция «Наука Промышленность Оборона» (г. Новосибирск, 2021 г.); Национальная научно-техническая конференция «АПИР-26» (г. Тула, 2021 г.); V Международная научно-техническая конференция "Проблемы машиностроения" «Mechanical Science And Technology» (г. Омск, 2021 г.); II Всероссийская научно-техническая конференция им. Д.В. Коноплева «Перспективы создания и применения систем высокоточного оружия» (г. Тула, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 4 статьи по материалам конференций различного уровня, 2 статьи в изданиях, цитируемых *SCOPUS*. Получено 3 патента и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Общественное признание. Автор – лауреат премий имени С.И. Мосина за 2018 год за работу «Внедрение магнитно-импульсной обработки металлов в условиях мелкосерийного и серийного производства», а также за 2021 год за работу «Повышение технико-экономической эффективности магнитно-импульсных технологий при производстве деталей специзделий за счет создания новых высокоресурсных индукторных систем». Награжден Почётной грамотой ПАО «Тульский оружейный завод» (2019 г.), благодарностью Тульской городской думы (2022 г.). Лауреат областного конкурса Инженер года 2022 и победитель первого тура всероссийского конкурса Инженер года 2022.

Структура и объём диссертации Диссертационная работа состоит из введения и четырех разделов, заключения, списка литературы из 140 наименований, приложений и включает 121 страницу машинописного текста, содержит 55 рисунков и 10 таблиц. Общий объем – 126 страниц.

Автор выражает особую благодарность доктору технических наук, профессору Тульского государственного университета Проскурякову Н.Е.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована научная новизна, практическая значимость полученных результатов, выносимых на защиту.

В первой главе на основе работ отечественных и зарубежных ученых показано современное состояние отрасли МИОМ. Произведен обзор производимых магнитно-импульсных установок, приведена классификация деталей, которые возможно производить данным методом. Рассмотрены основные типы индукторных систем и возможность их использования в условиях серийного производства, а также существующие работы по повышению их ресурса. Отмечены нерешенные вопросы, связанные с отсутствием необходимых рекомендаций по радиальной высоте витка индукторной системы на «обжим» без применения внешнего бандажа. Проанализированы методики расчета основных параметров обработки МИОМ, при этом выявлена сложность аналитических расчетов без компьютерного моделирования. Рассмотрены численные методы компьютерного моделирования параметров МИОМ с возможностью применения для проверки инженерных расчетов. В заключении сформулирована цель работы, а также задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлен алгоритм расчета основных параметров МИОМ с уточнением собственных сопротивлений и индуктивностей индуктора и заготовки. Необходимая энергия для выполнения операции вычисляется по формуле:

$$W = \frac{P_m \cdot \Omega \cdot \Delta_e}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4},$$

где P_m – амплитуда давления магнитного поля; Ω – площадь рабочей поверхности индуктора; Δ_e – эквивалентный зазор между индуктором и заготовкой; K_1 – коэффициент согласования параметров индуктора и магнитно-импульсной установки (МИУ); K_2 – коэффициент, учитывающий потери в разрядном контуре, K_3 – коэффициент, учитывающий, уменьшение давления на заготовку в рабочем зазоре индукторной системы; K_4 – коэффициент, учитывающий просачивание магнитного поля через стенку заготовки, при условии: $K_1, K_2, K_3, K_4 > 1$. Неточность расчетов данных коэффициентов, ведет к повышению расчетной энергии, что, как следствие, может привести к отказу от выбора МИОМ при выполнении операции (например, если расчетная энергия будет выше, чем собственная энергия МИУ).

$$K_1 = \frac{L_c}{L_c + L_{dc}} = \frac{f_{dc}^2 - f^2}{f_{dc}^2}, K_2 = e^{(-\frac{1}{Q_\Sigma} \cdot \tan^{-1} 2 \cdot Q_\Sigma)}, K_3 = 1 - \frac{\Delta_e}{r_3}, K_4 = \frac{1}{1 + \frac{1}{Q_3^2}},$$

где L_{dc} и f_{dc} – индуктивность и частота разрядного тока МИУ в режиме короткого замыкания; f – рабочая частота разрядного тока; L_c – эквивалентная индуктивность системы (индуктор-заготовка) индуктора; r_3 – расчетный внутренний радиус заготовки, Q_3 и Q_Σ – добротности контуров заготовки и системы «индуктор-заготовка» соответственно.

$$Q_3 = \omega \cdot \frac{L_3}{R_3}, \omega = 2 \cdot \pi \cdot f, f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_c + L_{dc}) \cdot C}},$$

где ω – круговая частота разрядного тока, L_3 – индуктивность заготовки, R_3 – активное сопротивление заготовки, где C – емкость конденсаторов МИУ.

$$L_3 = \frac{d_3^2}{l_3} \cdot \left(4,1 + 3,9 \cdot \left(\frac{l_3}{d_3} - 0,3 \right) \right) \cdot 10^{-7} \text{ при } 0,3 \leq l_3/d_3 \leq 1;$$

$$L_3 = \frac{d_3^2}{l_3} \cdot \left(9,9 - \frac{3,2 \cdot d_3}{l_3}\right) \cdot 10^{-7} \text{ при } l_3/d_3 > 1.$$

Расчетный диаметр заготовки d_3 , при операции «обжим»: $d_3 = d_{3н} - 2 \cdot \Delta_{эl3}$, где l_3 – длина заготовки, $d_{3н}$ – наружный диаметр заготовки; $\Delta_{эl3}$ – эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в материал заготовки;

$$\Delta_{эl3} = \begin{cases} (1/2) \cdot \Delta_{эз} & \text{при } \Delta_{эз} \leq (1/3) \cdot h_3 \\ (1/3) \cdot h_3 & \text{при } \Delta_{эз} > (1/3) \cdot h_3 \end{cases},$$

где h_3 – радиальная толщина заготовки, $\Delta_{эз}$ – расчетное значение глубины проникновения электромагнитного поля в материал заготовки.

Активное сопротивление заготовки: $R_3 = \rho_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_3}{l_3 \cdot \Delta_{эl3}}$, где ρ_3 – удельное электрическое сопротивление материала заготовки.

Добротность разрядного контура: $Q_\Sigma = \frac{\omega \cdot (L_1 + L_{вн})}{R_1 + R_{вн} \cdot \left(\frac{M_{13}}{L_3}\right)}$, где L_1 , R_1 – собственные индуктивность и сопротивления индуктора, $L_{вн}$, $R_{вн}$ – вносимые параметры индуктивности и сопротивления в разрядный контур за счет взаимодействия с заготовкой при разряде, M_{13} – взаимная индуктивность индуктора и заготовки.

$$L_1 = \frac{d_1^2}{l_1} \cdot \left(4,1 + 3,9 \cdot \left(\frac{l_1}{d_1}\right)\right) \cdot N_1^2 \cdot 10^{-7} \text{ при } 0,3 \leq l_1/d_1 \leq 1,$$

$$L_1 = \frac{d_1^2}{l_1} \cdot \left(9,9 - \frac{3,2 \cdot d_1}{l_1}\right) \cdot N_1^2 \cdot 10^{-7} \text{ при } l_1/d_1 > 1,$$

где l_1 – длина индуктора по оси заготовки, N_1 – количество витков, d_1 – расчетный диаметр индуктора. $d_1 = d_{1в} + 2 \cdot \Delta_{эl1}$, где $d_{1в}$ – внутренний диаметр индуктора; $\Delta_{эl1}$ – эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в материал индуктора,

$$\Delta_{эl1} = \begin{cases} (1/2) \cdot \Delta_{э1} & \text{при } (1/2) \cdot \Delta_{э1} \leq (1/3) \cdot h_1 \\ (1/3) \cdot h_1 & \text{при } (1/2) \cdot \Delta_{э1} > (1/3) \cdot h_1 \end{cases},$$

где h_1 – радиальная толщина витка цилиндрического индуктора, $\Delta_{э1}$ – расчетное значение глубины проникновения электромагнитного поля в материал индуктора.

Активное сопротивление индуктора: $R_1 = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1}{l_1 \cdot \Delta_{эl1}} \cdot N_1^2$, где ρ_1 – удельное электрическое сопротивление материала индуктора; l_1 – длина индуктора по оси заготовки.

Взаимная индуктивность при операции «обжим»:

$$M_{13} = \left(\frac{d_3 \cdot d_1}{l_3 \cdot l_1} \cdot \left(\varphi \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l_3 + l_1}{d_1}\right)^2} - 4,5 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l_1 - l_3}{d_1}\right)^2}\right)\right) \cdot N_1 \cdot 10^{-7},$$

где φ – безразмерный коэффициент, $\varphi = \begin{cases} 5 & \text{при } l_3/d_1 > 1 \\ 4,8 & \text{при } l_3/d_1 < 1. \end{cases}$

Суммарные эквивалентные сопротивления и индуктивности системы «установка-индуктор-заготовка» при использовании одноконтурной эквивалентной схемы рассчитываются по формулам:

$$L_S = L_{dc} + L_{вн} + L_c, \quad R_S = R_{dc} + R_{вн} + R_c,$$

где L_{dc}, R_{dc} – индуктивность и сопротивление МИУ, $L_{вн}, R_{вн}$ – вносимые параметры индуктивности и сопротивления в разрядный контур за счет взаимодействия с заготовкой при разряде, L_c, R_c – эквивалентные индуктивность и сопротивления системы «индуктор-заготовка»;

$$L_{вн} = L_3 \cdot K_{11}^2 \cdot K_{12}^2, R_{вн} = R_3 \cdot K_{11}^2 \cdot K_{12}^2, K_{11} = \frac{M_{13}}{L_3}, K_{12} = \frac{Q_3}{\sqrt{1+Q_3^2}},$$

где K_{11} – коэффициент индуктивной связи заготовки с индуктором, K_{12} – коэффициент, учитывающий потери в контуре заготовки.

Полученные параметры обработки при необходимости могут использоваться в качестве исходных данных при проверке расчетов в программах реализующих МКЭ.

В третьей главе приводятся результаты численного моделирования поведения токопровода индукторной системы на «обжим» при воздействии давления, приложенного к внутренней поверхности токопровода, имитирующего воздействие электродинамических сил при взаимодействии с полем заготовки с помощью программы ANSYS (модуль ANSYS Transient Structural). В качестве материалов токопровода были выбраны металлы с пределом текучести от 70 до 250 МПа. В качестве материала межвитковой изоляции выбран текстолит ПТК толщина 1,5мм ГОСТ 28611-90. Характеристики материалов принимались согласно справочной литературе. Внутренний диаметр индуктора $D_{вн}$, предел текучести материала σ_m , и момент сопротивления сечения витка индуктора W_y были приняты как варьируемые входные факторы – X_1, X_2 и X_3 . В качестве выходной переменной (отклика) было выбрано максимальное давление на индуктор – Y .

В результате расчетов были получены значения максимально возможного давления на токопровод индуктора без перехода материала из упругого в пластическое состояние при условии сохранности изоляции.

После обработки результатов эксперимента получена следующая вторичная модель зависимости максимального давления от входных параметров:

$$Y = 13,315 - 5,944 \cdot x_1 + 5,444 \cdot x_2 + 4,222 \cdot x_3 - 3,042 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,028 \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,083 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,222 \cdot x_1^2 + 0,566 \cdot x_2^2 - 0,222 \cdot x_3^2.$$

Анализ уравнения регрессии показал, что наибольшее влияние на величину максимального давления на индуктор до начала перехода его материала из упругого в пластическое состояние оказывают внутренний диаметр индуктора, наименьшее – момент сопротивления сечения, о чем свидетельствуют абсолютные значения коэффициентов при кодированных значениях этих факторов при линейных членах уравнения регрессии. Максимальную нелинейность этой зависимости дает предел текучести материала индуктора, о чем свидетельствует абсолютное значение коэффициента при кодированном значении этого фактора при квадратичном члене уравнения регрессии. Наибольшее совместное влияние на функцию отклика оказывают внутренний диаметр и предел текучести.

В результате анализа полученных данных установлено, что наибольшее влияние на функцию отклика оказывают входные параметры первой степени, т.е. функция отклика близка к линейной.

Для исследования влияния взаимодействия токопровода и межвитковой изоляции для некоторых опытов были произведены повторные исследования без

учета трения между витками индуктора и текстолитовой изоляцией (Рисунок 1). Установлено, что токопровод индуктора при учете силы трения между поверхностями витков и межвитковой изоляции способен выдерживать в среднем в 1,33 раза большее давление электродинамических сил, чем без данного учета (Таблица 1). Выявлено, что опасная зона, где достигаются максимальные механические напряжения, находится на внутренней поверхности второго или предпоследнего витков, то есть в следующих витках от зон закрепления, что подтверждается на практике.

Таблица 1 – Результаты моделирования максимального давления по прочности индуктора

№	Двн, мм	σ_m , МПа	W_y , мм ³	P_1 , Мпа	P_2 , Мпа
1	50	70	21	8	6
2	50	70	32	12	9
3	50	70	43	15	11
4	50	160	32	20	15
5	50	160	43	24	18
6	50	250	21	22	17
7	50	250	32	29	22
8	100	70	21	5.5	4
9	100	250	21	12	9
Среднее: 1,33					

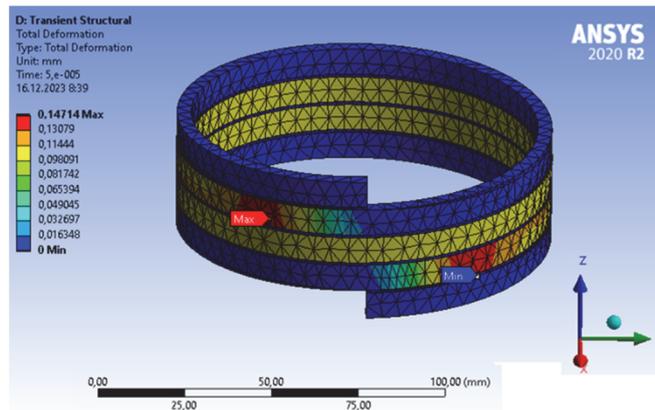


Рисунок 1 – Распределение механических напряжений для четырех-виткового индуктора

В четвертой главе приведены результаты разработанных и внедренных на ПАО «Императорский Тульский оружейный завод» технологических процессов изготовления деталей «Корпус» и «Обтюратор», разработанные приспособления для МИОМ. Приведена конструкция токопроводов индукторных систем на «обжим» сварного типа.

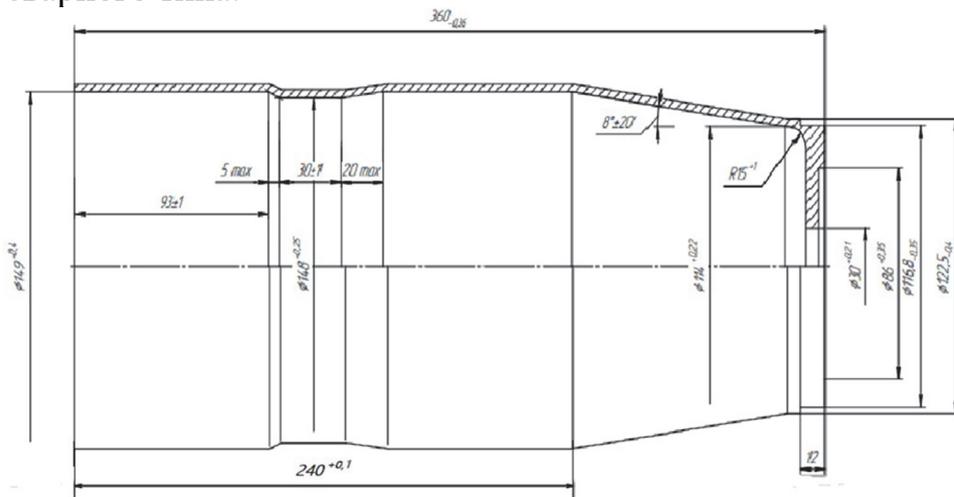


Рисунок 2 – Деталь «Корпус»

Для изготовления детали «Корпус» (Рисунок 2) (Материал: АМг6М) требуется произвести обжим по диаметру 149 мм. Для выполнения данной операции

методом МИОМ был произведен расчет параметров обработки для индукторных систем с токопроводами, выполненных из различных материалов (Таблица 2), а также проведено моделирование с помощью программы LS-DYNA.

Расчёт с помощью LS-DYNA показал правильность аналитических расчетов. В результате анализа полученных данных принято решение об использовании индуктора с медным токопроводом по следующим причинам:

1. Минимальное напряжение разряда.
2. Минимальная температура разогрева токопровода, что существенно влияет на электроизоляционные и прочностные свойства изоляции (Рисунок 4).

Распределение магнитного поля (для медного индуктор) показано на рисунке 4.

Таблица 2 – Результаты моделирования максимального давления по прочности индуктора

Материал токопровода	f , Гц	W , Дж	U , в
Медь М1	7268	8234	8052
Сталь 45	5620	16020	11230
Бронза БрБ2	6601	10690	9173

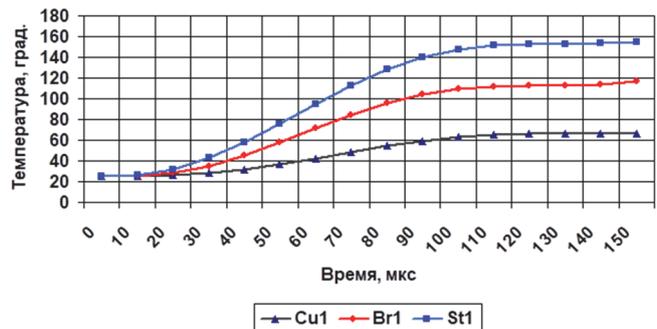


Рисунок 3 – График температур индукторов (поверхность, обращенная к заготовке)

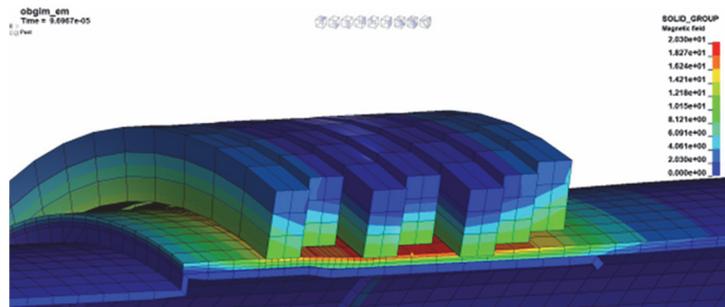


Рисунок 4 – Распределение магнитного поля (для медного индуктора)

Для изготовления детали «Корпус» разработано приспособление (патент 2743270) представленное на рисунке 5.

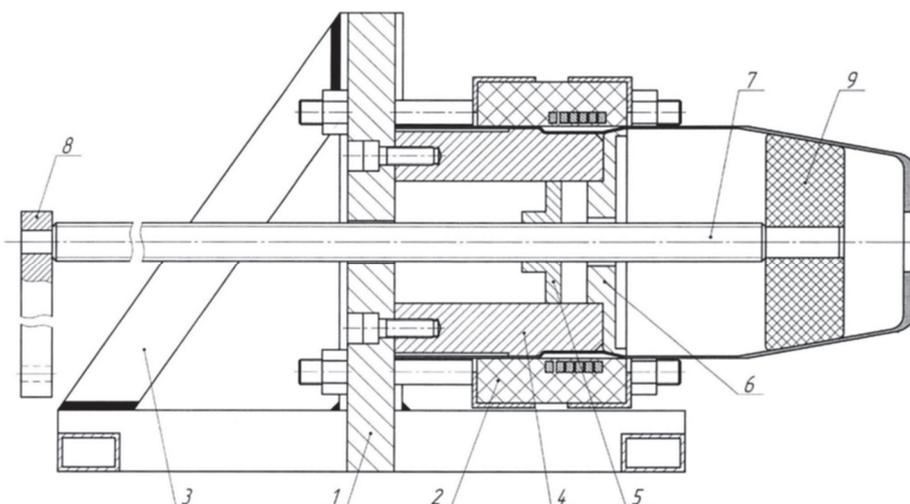


Рисунок 5 – Оснастка для «обжима»:
 1 – Плита, 2 – Индуктор, 3 – Рама,
 4 – Оправка, 5 – Выталкивающая втулка, 6 – Сборная оправка, 7 – Винт,
 8 – Ручка, 9 – Конус выталкивателя

Точность изготовления детали достигается за счет использования сборной оправки (Рисунок 5, поз. 6.), которую оператор МИУ собирает до начала операции.

Дальнейшим развитием применения сборных конструкций оправок для трубных заготовок в условиях серийного производства могут служить конструкции оснастки с устройством для формоизменения трубчатой оболочки магнитно-импульсной штамповкой (Рисунок 6, патент №2760970), с пневмоприводом.

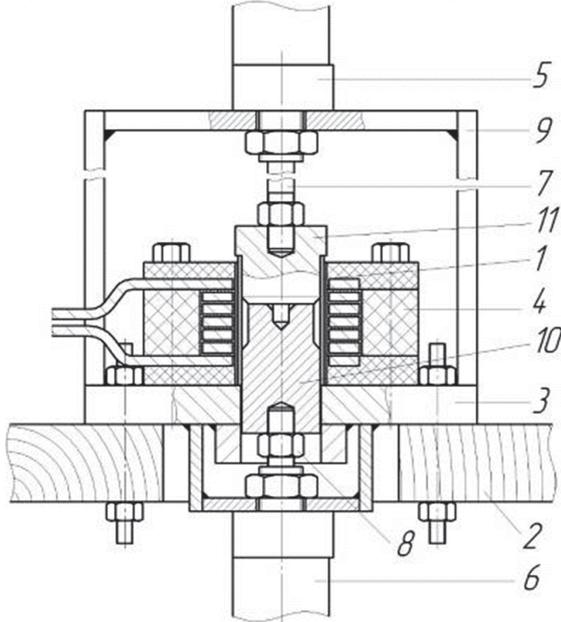


Рисунок 6 – Устройство для формоизменения трубчатой оболочки магнитно-импульсной штамповкой:

1 – заготовка, 2 – основание, 3 – основные рамы, 4 – индуктор, 5 – верхний пневмоцилиндр, 6 – нижний пневмоцилиндр, 7 – шток верхнего пневмоцилиндра, 8 – шток нижнего пневмоцилиндра, 9 – рама, 10 – нижняя часть оправки, 11 – верхняя часть оправки

Одним из способов снижения себестоимости изготовления деталей методом МИОМ, является снижение стоимости изготовления индукторных систем. Для выполнения операций по схеме «обжим» разработан индуктор сварной конструкции (Рисунок 7) для магнитно-импульсной обработки полых осесимметричных заготовок с токопроводом, состоящим из отдельных сегментов в виде разрезных дисков, изогнутых в виток (Рисунок 8), с вырезанным сектором с постоянным шаговым расстоянием, а также токоподводов, приваренных к крайним сегментам (Патент № 2790582).



Рисунок 7 – Токопровод в сборе

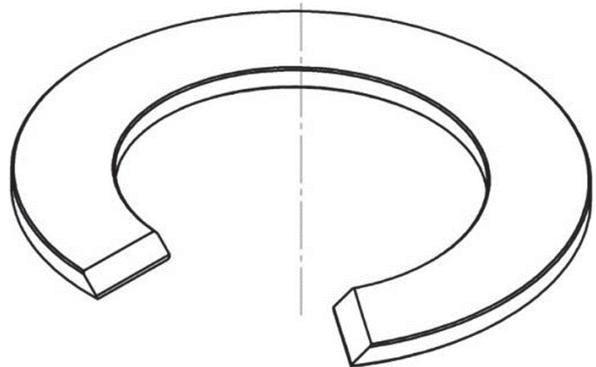


Рисунок 8 – Виток индуктора токопровода сварного типа

Таблица 3 – Сравнение технологических процессов изготовления токопроводов индукторных систем методом точения и с использованием сварки

№	Операция		Оборудование		Время, час.		Стоимость, руб.	
	Сварка	Точение	Сварка	Точение	Сварка	Точение	Сварка	Точение
1	Рубка	Резка	Ножницы гильотинные НД3316	Станок отрезной полуавтом.	0,25	0,3	700	800
2	Токарная обработка	Токарная обработка	Станок токарный 1К63	Станок токарный 1К63	4	6	2800	4200
3	Фрезер.	Фрезер.	Станок с ЧПУ Ми-сгоп	Вертик. фрезерный станок 6Т13	1,5	7,5	930	9800
4	Сварка, слесарная обработка	Слесарная обработка	Сварочный полуавтом, УШМ	–	1,5	4	900	2000
Итого:					7,25	17,8	5330	16880

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в теоретическом и экспериментальном обосновании новой конструкции индукторных систем на «обжим», снижающей себестоимость данного инструмента для применения в серийном производстве, а также разработке новых приспособлений для обработки тонкостенных полых осесимметричных заготовок методом МИОМ в условиях серийного производства, повышающих геометрическую точность этих изделий. В процессе выполненных исследований получены следующие **основные результаты и сделаны выводы.**

1. Анализ существующих методик расчета параметров МИОМ показал, что алгоритм расчета индукторных систем для серийного производства должен не только основываться на максимальной эффективности операции, но и включать в себя прочностные расчеты токопровода и изоляции для увеличения срока службы данного инструмента.

2. Усовершенствован алгоритм расчета параметров энергозатрат процессов МИОМ с уточнением собственных индуктивностей и сопротивлений индуктора и заготовки с возможностью использования полученных данных для последующего моделирования в программе МКЭ, а также включающий в себя прочностной расчет индукторной системы на «обжим». На основе данного алгоритма разработано программное обеспечение для расчета технологических параметров процессов МИОМ. Относительная погрешность определения индуктивности компонентов системы не превышает 5 %.

3. Проведенное исследование воздействия давления электродинамических сил на токопровод и межвитковую изоляцию индукторной системы на «обжим» показало, что использование межвитковой изоляции из материалов с высокой механической прочностью и высоким коэффициентом трения в контакте с металлом токопровода приводит к упрочнению индукторной системы в 1,33 раза. Этим требованиям удовлетворяют текстолит и стеклотекстолит и не соответствуют используемые в настоящее время фторопласт, лавсан и другие полимеры. Опасная зона, где достигаются максимальные напряжения, находится на внутренней поверхности второго или предпоследнего витков, то есть в следующих витках от зон закрепления.

4. Установлено, что наибольшее влияние на величину максимального давления на индуктор до начала перехода его материала из упругого в пластическое состояние оказывает внутренний диаметр индуктора, наименьшее – момент сопротивления сечения. Максимальную нелинейность этой зависимости дает предел текучести материала индуктора. Наибольшее совместное влияние на функцию отклика оказывают внутренний диаметр и предел текучести.

5. Разработана конструкция и технология изготовления индукторных систем на «обжим» с токопроводом сварного типа со стоимостью изготовления в три раза ниже по сравнению с индукторными системами с токопроводом, выполненным по технологии точения, что может снизить себестоимость обрабатываемых деталей и уменьшить время на подготовительные работы.

6. Разработаны технологические оснастки, позволяющие расширить возможности применения технологии МИОМ в серийном производстве для обработки тонкостенных полых осесимметричных деталей из различных металлов и сплавов, повысить точность изготавливаемых деталей за счет сборной конструкции данных приспособлений.

7. Результаты исследований использованы для разработки технологических процессов изготовления деталей «Корпус» и «Обтюратор», внедренных на серийном производстве ПАО «Императорский Тульский оружейный завод». Общий экономический эффект при внедрении составляет более 1,5 млн рублей.

8. Отдельные материалы исследования использованы на предприятии АО «Тулаточмаш», в учебных процессах кафедр «Механика и процессы пластического формоизменения» (МиППФ) ТулГУ и А2 «Технология конструкционных материалов в производстве ракетно-космической техники» БГТУ «Военмех».

Научные и практические результаты диссертации рекомендуется применять при подготовке технологических операций магнитно-импульсной обработки по схеме «обжим» тонкостенных полых осесимметричных заготовок в условиях серийного производства.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационной работы связаны с расширением номенклатуры изделий обрабатываемых методом МИОМ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Юсупов, Р.Ю. Многопостовые магнитно-импульсные установки промышленного назначения / Р.Ю. Юсупов, В.А. Глущенко, **И.В. Зверев** // Кузнечно-штамповочное производство. – 2020. – № 2. – С. 20-27.
2. **Зверев, И.В.** Моделирование процесса раздачи корпусных деталей специального назначения / **И.В. Зверев**, Н.Е. Проскуряков, Д.Г. Черников // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2021. – Вып. 6. – С. 401-405. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-401-406.
3. Глущенко, В.А. Основные направления совершенствования индукторов для магнитно-импульсной обработки. Повышение их прочности и ресурса / В.А. Глущенко, **И.В. Зверев**, В.И. Песоцкий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 6. – С. 67-71.
4. **Зверев, И.В.** Моделирование и прочностной расчет спирального индуктора с использованием программы ANSYS / **И.В. Зверев** // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2021. – №. 12. – С. 159-163. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-154-159.
5. **Зверев, И.В.** Расчет на прочность спирального индуктора с использованием методов планирования эксперимента / **И.В. Зверев**, Н.Е. Проскуряков // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2021. – №. 12. – С. 159-163. – DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-159-164.
6. **Зверев, И.В.** Оценка возможности изготовления детали «обтюратор» методом магнитно-импульсной штамповки / **И.В. Зверев**, Д.Г. Черников, А.Н. Пасько [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2023. – №8 – С. 691-698. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-691-692.
7. **Зверев, И.В.** Разработка конструкций индукторных систем на «обжим» со спиралью сварного типа / **И.В. Зверев**, А.Н. Пасько, Н.Н. Архангельская // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2023. – №. 12. – С. 596-598. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-596-597.
8. **Зверев, И.В.** Моделирование процесса обжима корпусных деталей методом магнитно-импульсной штамповки / **И.В. Зверев**, А.Н. Пасько, Н.Н. Архангельская [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 603-608. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-603-604.

Публикации в журналах, цитируемых в SCOPUS

9. Proskuriakov, N.E. Longitudinal stress waves in viscoelastic and plastic rods / N.E. Proskuriakov, I.V. Lopa, **I.V. Zverev** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – P. 1441. – DOI:10.1088/1742-6596/1441/1/012109.
10. Proskuriakov, N.E. The effect of heat transfer on the stress-strain material state considering the final rate of heat spread / N.E. Proskuriakov, I.V. Lopa, **I.V. Zverev** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P 1901. – DOI:10.1088/1742-6596/1901/1/012122.

Патенты и свидетельства:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666161 Российская Федерация. Программный комплекс расчета операций обжима и раздачи трубчатых деталей магнитно-импульсной штамповкой; № 2019664729; заявлено 19.11.2019, опубликовано 05.12.2019, Бюл. № 12 / **Зверев И.В.** [и др.]; Правообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614180 Российская Федерация. Моделирование и проектирование технологических операций обжима, раздачи и калибровки трубчатых деталей магнитно-импульсной штамповкой; № 2021610712; заявлено 26.01.2021, опубликовано 19.03.2021, Бюл. № 3 / **Зверев И.В.** [и др.]; Правообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614234 Российская Федерация. Программа расчета электротехнических параметров операций обжима и раздачи трубчатых деталей магнитно-импульсной штамповкой; N 2021610716; заявлено 26.01.2021, опубликовано 22.03.2021, Бюл. № 4 / **Зверев И.В.** [и др.]; Правообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

14. Патент 2743270 Российская Федерация, МПК В 21 D 26/14 В. Устройство для формоизменения оболочки типа "стакан" магнитно-импульсной штамповкой [Текст] / **Зверев И.В.** и др.; заявитель и патентообладатель ПАО «Императорский Тульский оружейный завод». — № 2020125491; заявл. 23.07.20; опубл. 16.02.21, Бюл. № 5.

15. Патент 2760970 Российская Федерация, МПК В 21 D 26/14 В, МПК В 21 D 37/02. Устройство для формоизменения трубчатой оболочки магнитно-импульсной штамповкой [Текст] / **Зверев И.В.** и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ. — № 2021108745; заявл. 30.03.21; опубл. 01.12.21, Бюл. № 34.

16. Патент 2790582 Российская Федерация, МПК В 21 D 26/14 В (2006.01). Индуктор для магнитно-импульсной обработки цилиндрических заготовок [Текст] / **Зверев И.В.** и др.; заявитель и патентообладатель БГТУ «ВОЕНМЕХ». — № 2021134844; заявл. 26.11.21; опубл. 27.02.23, Бюл. № 6.

***В других изданиях и материалах конференций опубликовано
4 работы объемом 1 пл. с долевым участием автора 0,7 пл.***

Подписано в печать 25.09.2024

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 44

Отпечатано в типографии ПАО «Императорский Тульский оружейный завод»

300041, г. Тула, ул. , 1